

Б. К. Шапкенов, В. П. Марковский, А. М. Акаев
Павлодарский государственный университет имени С. Торайгырова
(г. Павлодар, Казахстан)

А. Б. Кайдар
АО «УК СЭЗ «ХимПарк Тараз» (г. Шу, Казахстан)

А. В. Марковская
ФГБОУ ВПО «Омский государственный университет путей сообщения»
(г. Омск, Россия)

ИНВЕРТОРЫ С ПРЯМЫМ ЦИФРОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Большинство выпускаемых сегодня преобразователей частоты для регулирования скорости вращения трехфазных двигателей обеспечивают управление инвертором напряжения в режиме синусоидальной центрированной (симметричной) широтно-импульсной модуляции.

Суть метода состоит в одновременном управлении на заданной несущей частоте (обычно 10-20 кГц) сразу всеми шестью ключами инвертора (рис. 1) таким образом, что в средних точках каждой стойки инвертора формируются волны синусоидального выходного напряжения U_1 , U_2 , U_3 , сдвинутые друг относительно друга на 120 электрических градусов. При этом верхний и нижний ключи всегда коммутируются в противофазе и максимальная амплитуда выходного сигнала равна половине напряжения на звене постоянного тока $U_{dc}/2$. Если для формирования напряжения U_{dc} использовать стандартный неуправляемый выпрямитель, то двигатель окажется недоиспользованным по напряжению примерно на 15 %.

Сегодня можно констатировать, что все теоретические вопросы решены и, более того, аппаратно поддержаны в конструкциях встроенных ШИМ-генераторов ряда специализированных микроконтроллеров.

Суть метода, получившего название широтно-импульсной модуляции базовых векторов (векторной ШИМ-модуляции), состоит в отказе от одновременной коммутации всех ключей инвертора и в переходе к коммутации между несколькими, заранее выбранными состояниями инвертора, каждое из которых соответствует определенному пространственному положению вектора результирующего напряжения, приложенного к двигателю.

В табл.1, показаны схемы включения силовых ключей и векторные диаграммы для наиболее часто используемых базовых векторов, соответствующего стандартной 6-тактной коммутации 1; 0,5; 0,5 (верхний ключ, два нижних или два верхних, нижний).

В векторной ШИМ выделяют восемь возможных состояний инвертора и нумеруют их двоичными цифрами от 000 до 111. Каждый разряд указывает, какой из ключей какой стойки в настоящее время включен. Единице соответствует включенное состояние верхнего ключа стойки и выключенное состояние нижнего, нулю соответствует включенный нижний ключ и отключенный верхний. Графически возможные состояния можно представить в виде шестигранника, показанного на рис.2. Имея восемь базовых векторов, два из которых «нулевые» из-за отключенного напряжения (0), а остальные сдвинуты в пространстве на 60 электрических градусов (рис. 2), можно воспроизвести любой требуемый вектор выходного напряжения путем переключения на периоде ШИМ между двумя базовыми векторами текущего сектора U_x и U_{x+60} и нулевыми векторами $O(000)$ и $O(111)$.

Как показано на рис. 2 (верхний левый), в предельном случае, когда нулевые векторы не используются, годограф вектора результирующего напряжения представляет собой шестиугольник, описанный вокруг базовых векторов. С учетом того,

что амплитуда базового вектора составляет $2/3 U_{dc}$, возможно формирование кругового годографа вектора результирующего напряжения с амплитудой $0,577 U_{dc}$, что на 15 % больше амплитуды выходного напряжения для случая классической синусоидальной центрированной ШИМ.

Основным недостатком векторной ШИМ является невозможность реализации заданных векторов на границах секторов из-за влияния «мертвого» времени [1, 2]. Это особенно заметно при работе на малых скоростях вращения (малой амплитуде вектора напряжения), когда регуляторы тока сталкиваются с нелинейностью и не могут отработать задание тока. Для наглядности приведем пример. Если скважность по верхнему ключу фазы близка к нулю, а ток втекает в фазу, то эффективное значение среднего потенциала фазы будет выше заданного, за счет того, что в течении «мертвого» времени ток будет протекать через верхний обратный диод. Таким образом, вектор подходит к границе сектора с «опозданием», то есть по достижению задания потенциала фазы (скважности) нуля, напряжение фазы определяется величиной «мертвого» времени. Если вектор напряжения поворачивается дальше, то происходит смена рабочего сектора (рис.2) на соседний, где эта фаза оказывается пол-

Таблица 1 - Схемы включения силовых ключей и векторные диаграммы

Базовый вектор		Схема включения и векторная диаграмма	Фазные напряжения (U_ϕ/U_{dc})		
обозначение	код		U_c	U_b	U_a
O(000)	000		0	0	0
$U_0(001)$	001		-1/3	-1/3	+2/3
$U_{60}(011)$	011		-2/3	+1/3	+1/3
$U_{120}(010)$	010		-1/3	+2/3	-1/3
$U_{180}(110)$	110		+1/3	+1/3	-2/3

ностью выключенной, то есть ее потенциал становится равным нулю относительно минусовой шины звена постоянного тока. Разные авторы предлагают много способов устранения данного скачкообразного изменения потенциала, например, переход к 12-секторной векторной ШИМ [1]. Но проблема остается, так как в этом случае регуляторы тока фаз все равно работают с той же нелинейностью, но уже при другом электрическом угле. Этот недостаток векторной ШИМ заметен на малых амплитудах напряжения и связан с наличием малых скажностей, что и требовалось исключить в новом методе формирования напряжения [4].

Разработанный метод основан на вывешивании фазных потенциалов между отрицательной и положительной шиной звена постоянного тока. Фазные потенциалы получаются при преобразовании вектора напряжения из полярных координат в систему трехфазных или в системах векторного управления во время обратных фазных преобразований из двухфазной системы в трехфазную. Если ко всем полученным значениям фазных потенциалов прибавить или вычесть константу, то значения линейных напряжений не изменятся, так как они представляют собой разность фазных потенциалов.

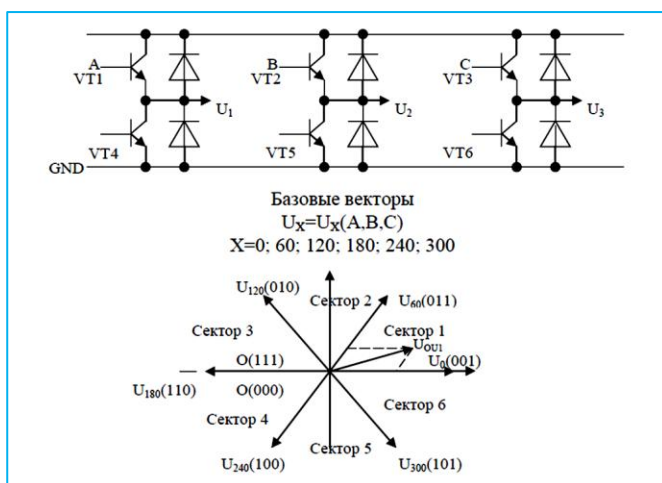


Рисунок 1 - ШИМ – модуляция базовых векторов

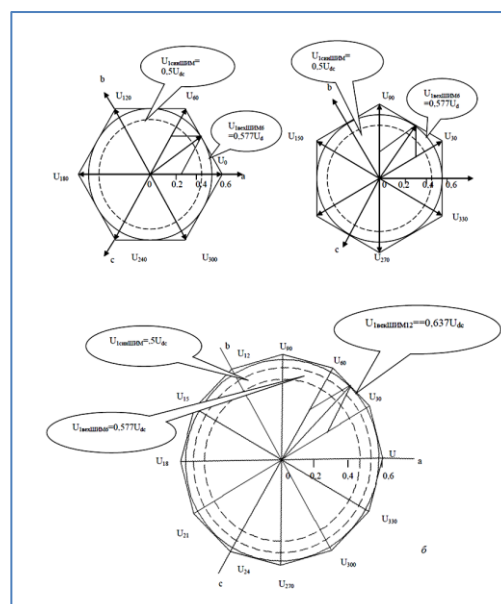


Рисунок 2 – Сравнительный анализ различных методов ШИМ-модуляции базовых векторов

Необходимая прибавка вычисляется исходя из максимальной разности потенциалов между фазами.

Данный метод ШИМ имеет ту же эффективность по использованию напряжения звена постоянного тока, что и векторная ШИМ, но за один период коммутируются все шесть ключей инвертора. Это увеличивает динамические потери в ключах, но система приобретает определенные преимущества.

Вектора напряжения с амплитудой близкой к нулю реализуются при скажности 50%, что обеспечивает линейную зависимость между скажностями и линейными напряжениями двигателя. Нелинейности, как и в случае с синусоидальной и векторной ШИМ, возникает только при смене знака тока фазы, в следствии влияния «мертвого» времени. Борьба с этим эффектом можно либо программно, анализируя знак тока, либо на аппаратном уровне [3], используя программируемую логическую матрицу для анализа разницы между задающим сигналом и воспроизведенным инвертором.

В программном случае возникает много проблем с малыми токами и моментом перехода тока через ноль. Как раз в то время, когда система проходит нелинейный участок (переход тока через ноль) информация о знаке тока, используемая для коррекции, исчезает.

Аппаратный компенсатор «мертвого» времени, построенный на базе программируемой логической матрицы, лишен данного недостатка, так как он получает полную информацию о формируемом векторе напряжения с помощью оптронного датчика.

Сравнивая сигнал управления с заданием, логика ПЛМ интегрирует ошибку, а затем добавляет ее, увеличивая ширину импульса управления, задерживая задний фронт, либо уменьшает, задерживая передний фронт. Функциональная схема устройства с аппаратным компенсатором «мертвого» времени показана на рис.3.

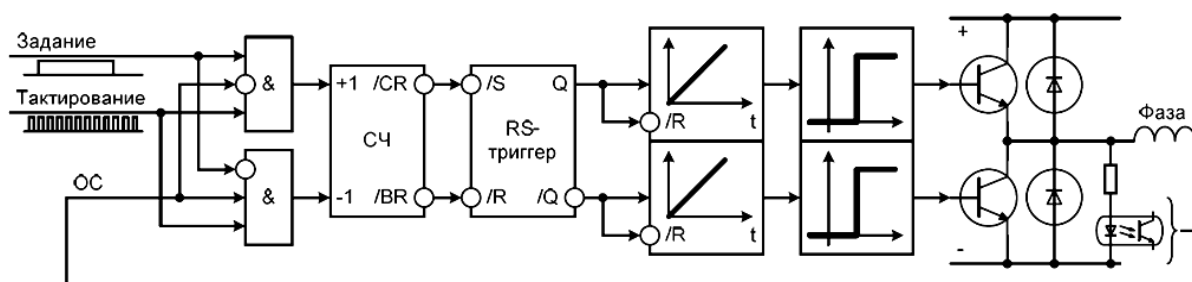


Рисунок 3 – Вариант функциональной схемы устройства с аппаратным компенсатором «мертвого» времени

Выводы. За период ШИМ происходит четыре коммутации ключей по сравнению с шестью переключениями в синусоидальной ШИМ, что снижает динамические потери в инверторе. Векторная ШИМ максимально полно использует запас напряжения звена постоянного тока, что на 15% больше, чем при синусоидальной ШИМ. Для инверторов с бутстрепным питанием драйверов верхних ключей, т. е. получающих питание от бутстрепной емкости или «плавающего» источника, требуется использовать привязку к нижней шине, то есть выбирать такие направления обхода базовых векторов, при котором инвертор использует нулевое состояние 000.

Список использованных источников

1. Kaidar A.B., Kopyrin V.S., Shapkenov B.K., Markovski V.P. Experimental studies inverter with pulse width modulation for power supply systems with renewable energy sources. Materials Intern native scientific and technical conference «YI reading Sh. Shokina», October 10, 2014, pp 134-140.
2. A.P. Kislov, A.B. Kaidar, B.K. Shapkenov, V.P. Markovsky. Stand-alone power systems with IGBT-inverter. VII Международная научная конференция молодых ученых «Электротехника. Электротехнология. Энергетика», 9 – 12 июня 2015 года, с.67-74, Новосибирск, Россия.
3. A.P. Kislov, A.B.Kaidar, B.K. Shapkenov. Diagnosis of inverter drives' faults VII «Applied Mechanics and Materials», 9 – 12 июня 2015 года, с.75-88, Новосибирск, Россия.
4. V.P. Markovski, A.B. Kaidar, B.K. Shapkenov. Stand-alone power systems with IGBT-inverter. Scopus and Web of Science «Applied Mechanics and Materials», 15-18 Juni 2015, P.251-258, Zürich, Schweiz.